溫室氣體及產品碳足跡國際發展趨勢

郭財吉

溫室氣體及產品碳足跡國際發展趨勢

郭財吉

中原大學工業與系統工程學系

1. 導論

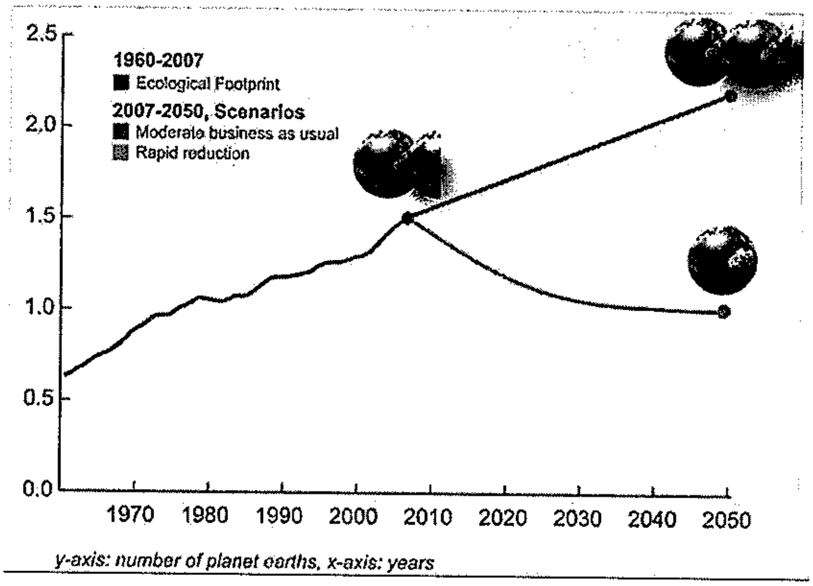
近年來因全球暖化日漸嚴重並影響人類生存問題，「節能減碳」已成為首要的議題，各國政府皆針對環境保護相關政策擬定適當措施與法規。1992 年聯合國環境規劃署在「二十一世紀議程(Agenda 21)」提倡永續消費和生產的觀念(Sustainable consumption and production, SC&P)，落實經濟與環保並重的觀念於政策中，期望能將環保轉化為商機，並能使消費者從中得益，各國政府也開始積極鼓勵企業訂定碳減量（carbon reduction）之計畫與目標。企業在推動碳減量計畫時，其首要工作為揭露自己的產品或服務之碳排放量，也就是碳足跡(Carbon footprint)。碳足跡定義為一項活動或產品的整個生命週期過程中，其直接與間接產生的二氧化碳排放量。一般在計算產品/服務之碳足跡時，大部分會以 ISO 14064 及 PAS 2050 為準則，利用生命週期分析法（ISO 14040 系列），以評估產品在原料生產、產品製造、配送、使用及廢棄各階段之環境衝擊，並研擬適當的減量計畫，持續改善以生產更環保的產品。而在施行生命週期分析時，必

須執行生命週期盤查（life cycle inventory），以充份了解生命週期中各階段能、資源投入與污染排放之狀況。

2. 碳足跡

2.1 碳足跡的定義

碳足跡定義為與一項活動或產品的整個生命週期過程所直接與間接產生的二氧化碳排放量。碳足跡的緣起於生態足跡。生態足跡分析是估算一特定時間點上人類社會的消費型態及水準對自然資源與自淨能力的依賴程度，並比較該社會所在地區之生物生產力可利用量，以判斷是否超限利用（李永展、陳安琪，1999）。由於全球化的緣故，一個都市所消耗的資源，未必都在當地生產，而很可能輸入自其他地方。舉例說：香港幾乎所有天然資源都由中國大陸供應，因此香港的生態需要面積亦包括為提供香港所消耗的資源而作的投資及開發。生態需要面積可以測出需要多少顆地球才能支應人類目前的生活型態。圖一表示現有的人類生活消費型態需要 1.5 個地球才能支應，因此人類應該要改善其現有的消費型態。



圖一 現有的人類生活消費需要 1.5 個地球才能支應

生態足跡中將人類的消費與廢棄物生產分為農作物、動物產品、魚類、森林生產、建成區域及化石能源之二氧化碳排放(或化石能源)足跡。圖二表示各國在生態足跡中的六項足跡指標。利用生態足跡與國民平均 GDP 取對數分析，可以發現 GDP 值越高的先進國家的生態足跡指標普遍較高。

5				ECOLOGICAL FOOTPRINT (global hectares per capita)						
6		Population (million)	Income Group	Ecological Footprint of Consumption	Cropland Footprint	Grazing Footprint	Forest Footprint	Fishing Ground Footprint	Carbon Footprint	Built-up Land
71	China	1,326.6	LM	2.2	0.53	0.11	0.15	0.12	1.21	0.09
73	India	1,184.7	LM	0.9	0.39	0.00	0.12	0.02	0.33	0.05
74	Indonesia	224.7	LM	1.2	0.42	0.02	0.14	0.22	0.33	0.07
78	Japan	127.4	HI	4.7	0.57	0.07	0.27	0.62	3.13	0.06
79	Jordan	5.9	LM	2.1	0.75	0.16	0.19	0.04	0.83	0.09
80	Kazakhstan	15.4	UM	4.5	1.05	0.18	0.16	0.02	3.07	0.06
81	Korea, Democratic People's Republic of	23.7	LI	1.3	0.36	0.00	0.14	0.04	0.72	0.06
82	Korea, Republic of	48.0	HI	4.9	0.75	0.08	0.26	0.54	3.17	0.07
83	Kuwait	2.9	HI	6.3	0.75	0.38	0.25	0.34	4.53	0.08
84	Kyrgyzstan	5.3	LI	1.2	0.55	0.16	0.03	0.01	0.41	0.08
85	Lao People's Democratic Republic	6.1	LI	1.3	0.52	0.14	0.37	0.01	0.11	0.12
86	Lebanon	4.2	UM	2.9	0.77	0.30	0.28	0.07	1.43	0.05
87	Malaysia	26.6	UM	4.9	0.58	0.09	0.49	0.51	3.12	0.08
88	Mongolia	2.6	LM	5.5	0.26	3.89	0.13	0.00	1.24	0.01
89	Myanmar	49.1	LI	1.8	0.95	0.01	0.33	0.28	0.09	0.13
90	Nepal	28.3	LI	3.6	0.37	0.05	0.20	0.00	2.85	0.09
91	Occupied Palestinian Territory	4.0	LM	0.7	0.35	0.04	0.00	0.00	0.34	0.00
92	Oman	2.7	HI	5.0	0.70	0.41	0.15	0.40	3.22	0.11
93	Pakistan	173.2	LI	0.8	0.34	0.01	0.09	0.01	0.26	0.05

圖二 各國在生態足跡中的六項足跡指標

(http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/)

2.2 碳足跡盤查

碳足跡相較於一般大家瞭解的溫室氣體排放量，碳足跡的差異之處在於其是從消費者端出發，破除所謂「有煙囪才有污染」的觀念。現今的碳足跡計算標準尚未有明確的國際標準，目前主要是由三個組織團體主導發展(王琬舒，2009)。英國首先與碳信託公司(Carbon trust) 共同開發碳足跡計算準則(PAS2050)，預期將作為 ISO 標準之種子文件，提供企業界評估產品碳排放一個一致性的準則。世界企業永續發展委員會(World business council for sustainable development， WBCSD) 與世界研究資源中心(World resources institute，WRI) 於 2008 年籌劃制訂產品及供應鏈溫室氣體排放量之標準，預定於 2010 年公告其內容。國際標準組織(ISO) 由 ISO 技術委員會 TC207/SC7 負責產品碳足跡之評估定量(ISO14067-1) 及溝通標準(ISO 14067-2)，目前仍屬研議階段。

PAS 2050 產品與服務生命週期溫室氣體排放評估規範(Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services) 是一項由英國標準協會(BSI British Standards)、碳信託、以及英國環境、食品與農村事務部(Department for environment, food and rural affairs, DEFRA) 於 2008年10月所聯合發佈的獨立及統一標準;其制定作業由一獨立、包

括非政府組織、學術界、企業界和政府部門代表在內的指導小組進行監督，並有多個子小組進行技術問題討論以提供技術支援。發佈內容除標準本身外，亦有其指引用以指導如何計算產品和服務的碳足跡，包括系統界線界定以分析與鑑別排放源。

PAS2050 建立在ISO 14040及14044對產品生命週期溫室氣體排放量評估之具體要求的基礎上，其特色包括：

(1) 提供現有商品和服務生命週期溫室氣體排放量的內部評估。

(2) 在與商品和服務有關之生命週期溫室氣體排放基礎上，有利於評估替代產品之配置、採購和生產方法、原材料和供應商的選擇。

(3) 提供正在進行之溫室氣體排放量方案減量的參考基準值(Benchmark).

(4) 使用一個共同和標準化的方法進行商品或服務生命週期溫室氣體排放量的評估，使結果具可比較性。

(5) 為企業或部門所產出之報告負責(BSI官網，2009)。

在規範於2008年10月底正式公布前，有多家企業約75種產品中已試行PAS 2050 標準，這些公司包括百事可樂(PepsiCo)、博姿(Boots)、Innocent、馬紹爾(Marshalls)、特易購(Tesco)、吉百利

(Cadbury)、哈利法克斯(Halifax)、可口可樂(Coca Cola)、金佰利(Kimberly Clark)、合作集團(The co-operative Group)等跨產業的跨國公司或連鎖企業。均能透過重新設計物流網路，使產品可以直接配送到商店，從而減少了運輸距離和包裝成本。企業透過了解二氧化碳排放的形成過程，並降低排放量，從而節省企業的相關費用。這是企業首次擁有一項可以測定產品和服務碳足跡的完善統一標準。將有利於企業真正認識到產品在碳排放方面的影響，並採取切實可行的途徑來降低整個供應鏈中的二氧化碳排放量，希望所有規模和產業的企業都將廣泛採用此規範。

2.3 碳足跡盤查步驟

碳足跡計算：目前國際主要關注之碳足跡標準為英國標準協會(British Standards Institution, Standards Institution, BSI) 所制定的PAS 2050-產品和服務生命週期溫室氣體排放評估規範。碳足跡的盤查首要工作就是界定邊界。邊界設定方法可分為B2C (business-to-consumer) 及 B2B (business-to-business)兩種。

- B2C包括從搖籃到墳墓各階段(cradle-to-grave)，即產品從原物料開採、擷取、運送、產品製造、配送、消費者使用，到最後廢棄階段的溫室氣體排放量均需納入計算項目；

- B2B則是計算從搖籃到大門(cradle-to-gate)的各項排放源，即從原物料開採囊括至該產品運送到下一個工廠或企業大門前的各階段。界定計算邊界後，檢視邊界內應量化之項目。計算碳足跡指南中制定了五個基本的步驟:

步驟1：構建產品生命週期的製程地圖，從原料材料處理，包括所有材料，能源和廢物流動。

步驟2：確認邊界和執行高階分析，以足跡優先次序來幫助計算。

步驟3：收集的材料數量，各個生命週期的階段活動和排放因素。

步驟4：計算產品碳足跡。

步驟5：評估不確定性的足跡分析。

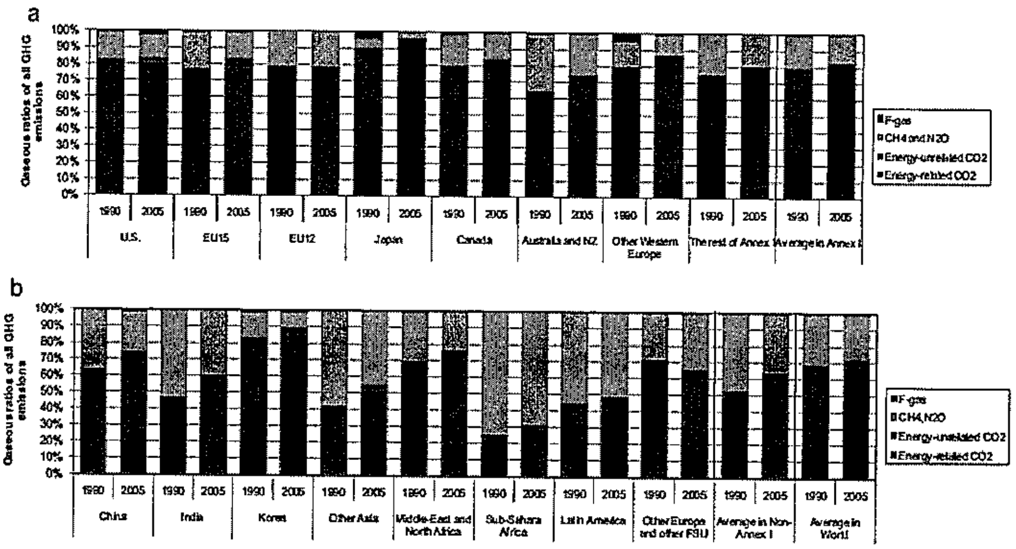
全球第一個碳足跡的個案，來自於英國計算牛角麵包的碳足跡如表一所示，由種麥、磨麥、發酵到做成麵包、販售、被消費者買走到吃下肚，即為產品的整個生命週期，找到每個階段和製程的碳排放便可以進行計算，各階段之碳足跡為，原物料階段 670 克 CO_2e，製造階段 200 克 CO_2e，配送階段 30 克 CO_2e，消費者階段 90 克 CO_2e，廢棄階段為 150 克 CO_2e，最後加總為一個牛角麵包可產生 1140 克 CO_2e (BSI British Standards，2008)。除此之外，也包含洋芋片，燕

麥，糖，水泥，人行磚，及麵包等。

表一 碳足跡計算分析以牛角麵包為例（單位：g CO_{2e}）

原物料階段		製造階段		配送階段		消費者階段		廢棄階段		總量
小麥	500	製程	200	運輸	30	冷藏	50	運輸	50	
麵粉	50			儲存	0	烘烤	40	腐化	100	
水	0			零售	0					
其他	100									
包材	20									
總量	670		200		30		90		150	1140

碳足跡也可以用來探討能源的使用，因為許多溫室氣體的排放大部分都來自能源的使用。圖三表示各個國家在 1990 年與 2005 年的溫室氣體排放源，由圖中可發現各國由能源所排放的溫室氣體都提高。



圖三 各國二氧化碳排放源分析（Homma, 2012）

2.4 生命週期盤查

生命週期的觀念與盤查的方法於 1960 年代末期已被提出，由環境考量面的角度來評估產品生產、服務及棄置等生命週期階段對環境造成之衝擊大小。藉由蒐集各階段輸入之量化數據資料進行生命週期衝擊評估模式分析，以瞭解產品的每一階段對個別及整體環境之潛在環境衝擊。雖然後續有許多學者投入生命週期的方法的研究，但因所涉及的範圍相當廣，因此觀念雖然被普遍認同，但執行時卻因著資料蒐集的困難，而無法廣泛的被企業界所使用。然而，隨著環境意識的提昇及資訊技術的普及，許多企業陸續將其生產資訊及環境資訊導入電子化技術，供應商協同概念也逐漸被落實於供應鏈中，雖降低了生命週期盤查的困難度，但卻仍因著現代企業的專業分工技術能力特性

及追求低成本兩項策略，而無法順利的執行。

生命週期的研究在 1990 年代初期快速的成長，其理論的發展已深具基礎，也有許多關於生命週期評估（Life Cycle Assessment, LCA）應用於實際案例的研究。Song and Lee（2010）提出，企業需依據產品的組裝架構調查產品的零組件在其生命週期的各階段之 GHG 排放，並建置其 Greenhouse gas BOM，於產品設計初期，即可具體評估與選擇的零件或組件，以達到生態化設計的目標。然而，生命週期盤查，由於其所牽涉的範圍較廣，如：搖籃到墳墓，搖籃到大門，在調查時需涵蓋數十至數百個供應商協助提供相關資料，因此需耗費許多人力、物力、成本、與時間去蒐集相關資料，如：直接物料，間接物料，使用的能源設備，排放的廢水，廢氣，及廢棄物等。如何能縮短盤查時間、降低成本、並增加資料的可再使用性，則是目前許多企業亟需解決之問題。

完整的生命週期盤查必須針對每一個供應商，實際至工廠盤查以獲得數據資料（primary data），但由於供應商的地理位置差異太大，需要事先規劃供應商盤查路徑，加上盤查時因為需要蒐集各項資訊會耗費企業及供應商的資源，如，人力、物力、成本，與時間，若無路徑規劃及控制將無法有效符合時間及成本效益。因此某些企業為了減

少盤查的人力與成本，會設定碳排放量盤查的精確度，主觀式的選擇部分供應商，以二級資料（secondary data）取代原廠數據資料，如此雖然可以減少盤查的成本，但卻降低資料的正確性。這裡所指的二級資料就是過去已經盤查過的資料。因此如何能適當選擇供應商，規劃供應商盤查路徑以盤查，同時又能降低成本，確保資料的正確性，則為現代企業在進行碳足跡盤查時的問題。學者將碳足跡/生命週期盤查的問題轉化為車輛路徑規劃的最佳化問題，建置整數線性規劃之數學模型，以發展碳足跡/生命週期盤查之供應商最佳路徑規劃決策模式。另外，針對二級資料與原廠數據資料的差異，進行敏感度分析，分析碳足跡/生命週期盤查之路徑最佳、效益最大、及成本最小之決策方式，節省時間，與提昇碳足跡運算效率。

2.5 生命週期評估軟體

LCA 軟體是一套評估環境衝擊的專業軟體，能將環境評估衝擊數據化，讓使用者能清楚的看見產品對環境所造成的衝擊，目前市面上的LCA軟體不下十幾種如Boustead Model(英國)、EcoPro(瑞士)、Chem Systems 的 LIMS(美)、DoitPro(工研院)、PIRA International(英)、Charlimers Industriteknik(瑞典)、Environmental Conscious Design Support System(美)、SimaPro(荷蘭)、GaBi(德)，

以下將介紹台灣最常使用的幾套 LCA 軟體：

（1）SimaPro

SimaPro 軟體是由荷蘭 Leiden 大學開發出來，在生命週期評估的領域中，屬於國際上相當普遍使用的軟體，是資料庫最豐富的 LCA 軟體之一且可在 Windows 介面下使用的視窗軟體。軟體於 1990 年問世，軟體操作流程依循 ISO14040 的標準進行管理分為目標與範疇界定、盤查分析、衝擊評估、闡釋、結果輸出以及其他的相關選項等。SimaPro 軟體的功能包括：

a. 可以結合各項不同的產品在同一產品項當中，找出其產品的生命週期，如產品及其包裝材。
b. 可以將產品進行分解，並將每一個分解的零件回收是否評估做環境上的考量。
c. 進行多項不同廢棄物處理策略對於環境的影響。
d. 可以選擇圖文輸出方式，使用者操作更為簡便。
e. 對於環境衝擊評估可利用不同的特徵化、標準化及權重的方法。
f. 可將分析的結果以不同的方式顯現並自動進行單位間的換算。
g. 同時由多人建構，也可以進行分開保存多個不同的檔案。
h. 可以建立多種環保法規資料庫，目前內建有歐盟、美國及 ISO 等

規範。

SimaPro 這套軟體除了能提供生命週期盤查資料外，也能將其資料進行量化，算出環境衝擊評估之數據，並將每一種衝擊轉化為環境指標(Eco-Indicators)，所呈現之數字越低則表示該產品對環境的影響越小。除了做完整的環境衝擊評估之外，SimaPro 也能做各個不同階段之環境衝擊。端看使用者最初界定之範圍是從搖籃到墳墓或是由搖籃到大門。雖然 SimaPro 擁有非常豐富之資料庫，不過大部分的資料庫均以歐美之資料為基礎建立該資料庫，並非適合每個國家的使用者，不過 SimaPro 也能建立屬於使用者自己的資料庫，由使用者依照產品組成之需求自行挑選適合之材質或以使用者所在地之資料建立。

(2) Gabi

Gabi 軟體是德國 Institut fuk Kunststoffprufung und Kunst-stoffkunde 所發展出的環境衝擊評估軟體，目前版本為第四版，資料庫包括 800 種不同能源與材料流程。每一種流程可讓使用者自行發展一套子系統，資料庫也提供 400 種工業流程，如工業製程、動力設備、服務、維修。多功能對話環境讓使用者可自行輸入或編輯資料。Gabi 起源於生命週期工程(Life Cycle Engineering)，包括科技、經濟

及環境等方面考量，由德國 Stuttgart 大學與 PE company 於 1989 年共同開發 Gabi 的草創版本，資料庫計有(鄭淑澐，2006)：

a. 能源與物質流(Material and energy flows)：有機/無機中間物、能源、鐵、鋼、鋁、非鐵金屬、塑膠、紙、板及木類製等。

b. 生產技術：冶金、塑膠、紡織、運輸等製程之完整資訊。

Gabi 軟體運用的範圍涵蓋了環境管理系統、物質與能量流分析、零排放、生命週期評估及環境化設計等領域，為一套功能強大的軟體工具。

（3）Doitpro

為台灣所發展的生命週期評估軟體，此軟體優勢具有本土環境資料庫，能提供國內廠商本土之環境化設計數據，該軟體主要以資料庫盤查工具為主要訴求，此軟體各項基本功能概述如下(鄭淑澐，2006)：

a. 盤查作業資料庫：將盤查的資料進行編輯，與本土性資料庫連結。所涵蓋的國內本土環境資料庫，包含水泥、橡膠、半導體、石化上游、塑膠單體、化學原料、金屬、鋁、電力、燃料、道路運輸、給水等資料庫。

b. 計算：使用者僅需勾選出物料名稱或組成，並設定欲計算層數，則電腦即可計算出該物料之環境負荷。

c. 參考資料庫：內有各種物料基礎流之資料、衝擊類別、衝擊評估方法、基礎流統計表等資料。

d. 系統維護：考量案例資料之累積與分享需求，此軟體可直接透過網路伺服器安裝，與其他主機資料交換。

（4）EIME

Bureau Veritas 公司的生態化設計解決方案相當廣泛，從能源消耗的計算到生態化設計諮詢皆是其強項，可協助企業建立自己的生態化設計系統並做好符合 EuP 指令和 EMAS/ ISO 14001 認證的準備(法商法立德公證有限公司台灣分公司)。為考量產品的生命週期、以多種標準評估影響環境的因素、持續不斷的努力去降低對環境所造成衝擊，最終發展出 EIME(Environmental Information & Environmental Explorer)資料庫與方法，此套軟體於 2003 年公開發售，希望能夠藉此為各個企業廣泛使用，提供設計團隊在產品設計階段將環境考量面加入，且該軟體專門針對電機電子類產品進行評估，言下之意就是 EIME 的開發者同時參與許多 EuP 指令生態化設計下的先期研究計畫，且其資料庫也是非常豐富並常常更新。同時，EIME 也廣為全球

政府環保機構所接受與參考，這一點從 EIME 已經替許多全球領導廠商製作過無數次環境宣告中不難看出。其軟體基本原理為：

a. 探討產品生命週期：物料或元件的選取、製程、原物料與能源的消耗、產品最終(end of life)之殘留價值。

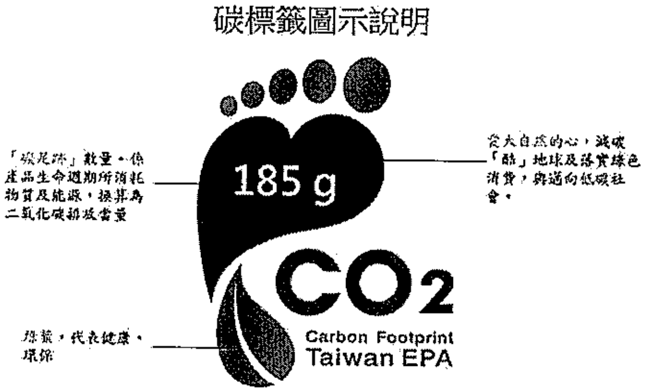
b. 對生命週期各階段進行環境影響評估。

c. 針對環境衝擊過大之項目做持續改善。

2.6 台灣的碳足跡標籤

台灣是全球第 11 個國家推動碳足跡標籤，如圖四。從原料取得、到回收，直接或間接的溫室氣體排放，換算成二氧化碳當量，稱為產品的碳足跡，碳標籤是將產品的碳足跡以標籤標示於商品。國際間不少企業已開始重視生產綠化商品的重要性，這不僅可為企業打造優質綠化形象，亦可提昇企業綠色競爭力。全球至 2009 年十二月止有英國、歐盟、美國、法國、日本、泰國等十個國家或地區之商品有碳標籤，我國行政院環保署亦於 2009 年 12 月 15 日公布選定「台灣碳標籤」，積極推動商品標示碳足跡標籤之政策，台灣碳足跡標籤如圖五，其中含有數字、綠色愛心及綠葉組成一個腳印之碳標籤，其圖面結構代表之意義如表二。

圖四　台灣為第11個推動碳標籤的國家



圖五　碳標籤圖示說明圖

表二 碳標籤意涵說明對照表

序號	內容	代表涵義
1	數字	代表「碳足跡」數量。係產品生命週期所消耗物質及能源，換算為二氧化碳排放當量
2	綠色愛心	愛大自然的心，減碳「酷」地球
3	綠葉	代表健康、環保

3. 結論

目前各國都在積極進行節能減碳，而碳足跡為節能減碳的第一步驟，也是非常重要的步驟。台灣的企業也因為政府的重視，除了環保署之外，農委會也積極的參與，並有許多的農產品也積極調查碳足跡，而隨著碳足跡的進行，企業發現其在生產製造有減碳的機會，並利用節能減碳的技術與設備進行減碳工作，除了企業的永續競爭力外，也可以維持人類生存環境的發展。

4. 參考文獻

（1）李永展、陳安琪，1999，應用生態足跡分析探討貿易對永續發展之影響，都市與計畫，26（2），133-151。

（2）Jong-Sung Song, 2010, Kun-Mo Lee, Development of a

low-carbon product design system based on embedded GHG emissions, Resources, Conservation and Recycling 54, 547-556.

（3）Homma, T., 2012, Quantitative evaluation of time-series GHG emissions by sector and region using consumption-based accounting. Energy Policy.

（4）鄭淑澐，2006，STN-LCD 製造業之生態效益分析研究，朝陽科技大學環境工程與管理系碩士班論文。